ホール推進機における放電不安定性の抑制とその推進効率への 影響に関するシミュレーション

学生員 山村 有希* 正員 根城 安伯*

Simulation on the Control of the Discharge Instability and its Influence to the Thrust Efficiency of Hall Thrusters

Yuki Yamamura*, Student Member, Yasunori Nejoh*, Member

Simulation for the instability of the discharge oscillation of the Hall thruster has been performed by considering the equation of continuity. It is shown that the ion current becomes stable when the cross-section of the channel is reduced. The improvement of the thrust efficiency is observed by reducing the cross-section of the channel.

キーワード：ホール推進機，放電不安定性，推進効率，シミュレーション

Keywords : Hall thruster, discharge instability, thrust efficiency, simulation

1. 背景および目的

電気推進機は軽量で軌道制御等に適しているため，宇宙空間における推進機として注目を集めている。また，宇宙構造物の大型化に伴って高い推進効率が求められている。電気推進機は太陽光エネルギーを電気エネルギーに変換し，積載燃料ガスをプラズマ化して推進エネルギーに利用する方式であるが，宇宙空間においては推力の大きさはもとより寿命の長さも重要な要素である。そのため，電気推進機の中でもホール推進機は高比推力，低加速度，シンプルな構造のため，長期ミッションに適している。また，推力と燃料噴射時間のバランスが適切であり，構造もシンプルであることから将来への期待が大きい。しかしながら，プラズマ生成時に放電電流の不安定振動が生じ⁽¹⁾⁽²⁾，それが電源系に負荷を与えるだけでなく，スラスタのプラズマを消滅させてしまうことさえあるため，その説明は急務である。この振動は主としてイオン振動が担っているため，イオン電流振動のメカニズムを解明すること，及びそれが引き起こす推進効率低下を理解することが必要であり，特にシミュレーション研究の不足が問題である。それにもかかわらず，電流振動抑制と推進効率への影響に関する報告が極めて少ない。これまでの研究によってこの振動現象は電離不安定性に起因するものであることが指摘されている。そこで，本研究ではホール推進機の推進性能向上のため，粒子間衝突による放電電流振動不安定性の低減をシミュレ

ーションで明らかにするとともに，スラスト性能評価として電流振動の制御による推進効率への影響を検討する。

2. シミュレーション結果

〈2・1〉 イオン電流振動の抑制 放電電流振動はホールスラスタの実用化のために解決しなければならない問題の一つであり，放電によって燃料気体である中性のキセノン(Xe)粒子とプラズマ粒子の衝突から引き起こされる。これは，周波数領域 10-90kHz の振動で最も頻度が高い。ここでは放電電流の主成分がイオン電流であることからイオン・中性粒子衝突による放電振動について考える。計算モデルとして次のような一次元連続の式を提案する⁽³⁾⁽⁴⁾。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} v_i n_i &= \gamma n_i n_n \\ \frac{\partial n_n}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} v_n n_n &= -\gamma n_i n_n \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

右辺はイオン・中性粒子衝突項を表す。イオン密度を n_i ，中性 Xe 粒子密度を n_n ，イオン速度 v_i ，中性 Xe 粒子速度 v_n ，陽極から出口向きにとったチャンネル距離を x ，イオン生成速度係数を γ とする。ホール推進機は二つの円環状磁極から構成されるが，その間の空洞の部分（放電室）をチャンネルと呼び，その断面積をチャンネル断面積と呼ぶ。磁極の外半径を r_1 ，内半径を r_2 とすると，チャンネル断面積 S は $S=\pi(r_1^2-r_2^2)$ と求められる。ここで使用した数値パラメータは， $\gamma=10^{-12}\text{m}^3/\text{s}$ ， $x=0.008\text{m}$ ， $v_i=1600\text{m/s}$ ， $v_n=160\text{m/s}$ である。図 1 に，イオン電流振動の計算結果を示す。シミュレーション結果を実測値と比較した。実験⁽¹⁾を模擬した計算結果が図 1 に示されている。実線はチャンネル断面積 $S=1.22 \times 10^{-2}\text{m}^2$ の場合，一重点線は $S=0.8 \times 10^{-2}\text{m}^2$ ，点線は $S=0.5$

* 八戸工業大学大学院工学研究科
〒031-8501 八戸市妙大開 88-1
Graduate School of Engineering, Hachinohe Institute of
Technology
88-1, Myo-Obiraki, Hachinohe, 031-8501

図1 イオン電流振動

Fig. 1. Ion current oscillation depending on time; Solid, solid and dotted, and dotted curve indicate $S=1.22 \times 10^{-2} \text{m}^2$, $S=0.8 \times 10^{-2} \text{m}^2$ and $S=0.5 \times 10^{-2} \text{m}^2$, respectively.

$\times 10^{-2} \text{m}^2$ の場合である。図1から、 $S=1.22 \times 10^{-2} \text{m}^2$ の場合は実験結果とほぼ対応するが、 $S=0.8 \times 10^{-2} \text{m}^2$, $S=0.5 \times 10^{-2} \text{m}^2$ の場合には、振幅が減少することを観測できる。即ち、断面積 S の縮小により電流の振幅が抑制されることがわかる。

〈2・2〉 イオン電流振動抑制による推進効率への影響

ホールスラスタの性能は、主に推力と推進効率により評価される。ここでは、推進性能評価の一つとして、チャンネル断面積の抑制によりイオン電流振動を抑制した場合の推進効率への影響を検討する。推力 F_T と、比推力 I_{sp} 、推進効率 η_T との関係は次のように表される。

$$I_{sp} = \frac{F_T}{\dot{m}g}, \quad \eta_T = \frac{F_T^2}{2\dot{m}P} \quad (2)$$

$\dot{m}$ は推進剤質量流量、 P は投入電力を表す。 m をキセノン質量、 η_u を利用効率、 I_b をイオンビーム電流、 P_d を放電電力、 ε_c をイオン生成コスト（エネルギー）とすると、次のように定義される。

$$\eta_u = \frac{mI_b}{e\dot{m}}, \quad \varepsilon_c = \frac{P_d}{I_b} \quad (3)$$

ここで、(3)式より放電電流を考慮する。 V_d は放電電圧、 I_e 、 I_i は電子電流、イオン電流を表す。 n_i 、 v_i をイオンの密度、速度とし、イオン電流は $I_i = en_i v_i S$ と定義されるため、(4)式はチャンネル断面積のパラメータを考慮した推進効率 η_T の式である。

$$\eta_T = \frac{\frac{m(I_e + I_i)V_d/\varepsilon_c}{e\dot{m}}}{1 + \frac{2e\varepsilon_c}{mg^2} \left(\frac{\frac{m(I_e + I_i)V_d/\varepsilon_c}{e\dot{m}}}{I_{sp}} \right)^2} \quad (4)$$

図2に推進効率の計算結果を示す。図1のシミュレーション結果と対応させて計算する。数値パラメータは、実験から得られている $V_d=400\text{V}$, $I_{sp}=1900\text{s}$, $I_e=1.0\text{A}$, $\varepsilon_c=300\text{W/A}$

図2 推進効率

Fig. 2. Thrust efficiency η_T vs. the mass flow rate $\dot{m}$; Solid, solid and dotted, and dotted curve correspond to $S=1.22 \times 10^{-2} \text{m}^2$, $S=0.8 \times 10^{-2} \text{m}^2$ and $S=0.5 \times 10^{-2} \text{m}^2$, respectively.

とした。(4)式を用いて推進剤質量流量に対する推進効率の変化を図2に示す。実線は図1の $S=1.22 \times 10^{-2} \text{m}^2$ に対応し、一重点線は $S=0.8 \times 10^{-2} \text{m}^2$ 、点線は $S=0.5 \times 10^{-2} \text{m}^2$ に対応している。図2からチャンネル断面積 S を抑制することによりイオン電流振動を低下させた場合、推進効率が向上することを観測できる。

3. 結論

本研究では、放電電流振動の安定化の解明のため、イオン・中性粒子衝突によるプラズマ振動を模擬し、推進効率への影響のシミュレーションを試みた。その結果、イオン電流振動の抑制にはチャンネル断面積の縮小が重要であることが示された。また、チャンネル断面積を抑制すると推進効率が向上することを示した。

本研究で提示したモデルから導かれた計算結果は、実験結果を含んでおり、推進効率を改善するための一つの指針を示唆している。

(平成17年6月29日受付、平成17年9月15日再受付)

文 献

- (1) J. M. Fife, M. Martinez-Sanchez, and J. Szabo : "A Numerical Study of Low-Frequency Discharge Oscillations in Hall Thrusters", 33rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit (1997.7)
- (2) J. P. Boeuf and L. Garrigues : "Low frequency oscillations in a stationary plasma thruster", *J. Appl. Phys.*, Vol.84, No.7, pp.3541-3554 (1998)
- (3) Y. N. Nejoh and Y. Yamamura : "Simulation of the collisional sheath structure near the outer wall of the Hall thruster", *Phys. Plasmas*, Vol.12, pp.033506 1-6 (2005)
- (4) Y. Yamamura and Y. N. Nejoh : "Investigation on Performance of a Hall Thruster for Spacecraft", *Advances in Appl. Plasma Sci.*, Vol.4, pp.431-436 (2003)